

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-124551

(43)Date of publication of application : 25.04.2003

(51)Int.Cl.

H01S 3/10  
G02F 1/35  
H01S 3/06  
H01S 3/30  
H04B 10/16  
H04B 10/17

(21)Application number : 2001-313203

(71)Applicant : KDDI SUBMARINE CABLE  
SYSTEMS INC

(22)Date of filing : 10.10.2001

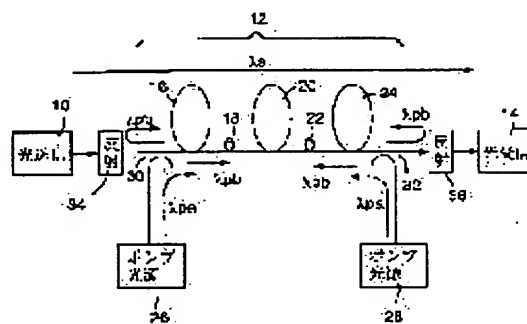
(72)Inventor : MIYAGAWA TETSUYUKI  
EDAKAWA NOBORU

## (54) OPTICAL AMPLIFIER, OPTICAL AMPLIFYING TRANSMISSION CHANNEL AND OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To stimulate a more distant EDF.

SOLUTION: An optical transmitting device 10 outputs signal light in 1,550 nm range to an optical fiber transmission channel 12. The optical fiber transmission channel 12 comprises a plurality of optical fibers 16, 18, 20, 22 and 24 connected in series. The optical fibers 18 and 22 are optical amplifying fibers to which erbium is added. Pump light sources 26 and 28 generate pump light of the wavelength shorter than the pump wavelength of the optical amplifying fibers 16 and 18 by Raman Stokes shift wavelength in the optical fibers 16 and 24. The output lights of the pump light sources 26 and 28 are applied to the optical fibers 16 and 24 through optical coupler 30 and 32, respectively. The optical fibers 16 and 24 generate laser oscillating light of primary Stokes light by the stimulated Raman scattering by high power pump light from the pump light sources 26 and 28. The laser oscillating wavelength of the primary Stokes light is controlled by reflectors 34 and 36. The laser oscillating light is inputted to the optical amplifying fibers 18 and 22 as pump light, and thereby the optical amplifying fibers 18 and 22 amplify the signal light.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

03.06.2004

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than withdrawal the examiner's decision of rejection or

application converted registration]

[Date of final disposal for application] 19.01.2005

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's  
decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (JP)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-124551

(P 2003-124551A)

(43) 公開日 平成15年4月25日(2003.4.25)

| (51) Int. Cl. <sup>7</sup> | 識別記号 | F I       | テマコード (参考) |
|----------------------------|------|-----------|------------|
| H01S 3/10                  |      | H01S 3/10 | Z 2K002    |
| G02F 1/35                  | 501  | G02F 1/35 | 501 5F072  |
| H01S 3/06                  |      | H01S 3/06 | B 5K002    |
| 3/30                       |      | 3/30      | Z          |
| H04B 10/16                 |      | H04B 9/00 | J          |

審査請求 未請求 請求項の数36 O L (全14頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2001-313203(P 2001-313203)

(22) 出願日 平成13年10月10日(2001.10.10)

(71) 出願人 595162345

ケイディディーアイ海底ケーブルシステム株式会社

東京都新宿区西新宿3丁目7番1号

(72) 発明者 宮川 哲之

埼玉県上福岡市大原二丁目1番15号株式会社ケイディディーアイ研究所内

(72) 発明者 枝川 登

埼玉県上福岡市大原二丁目1番15号株式会社ケイディディーアイ研究所内

(74) 代理人 100090284

弁理士 田中 常雄

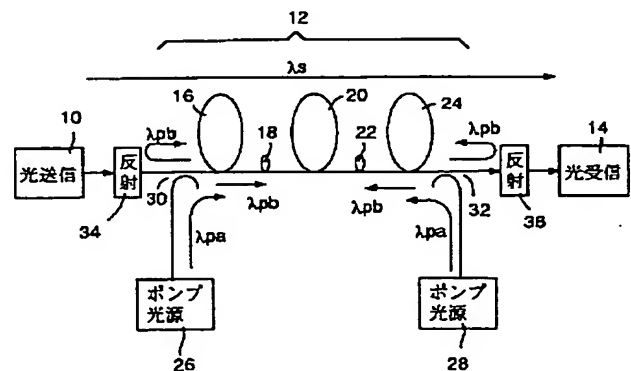
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光増幅器、光増幅伝送路及び光伝送システム

(57) 【要約】

【課題】 より遠くのEDFを励起する。

【解決手段】 光送信装置10は、光ファイバ伝送路12に1550nm帯の信号光を出力する。光ファイバ伝送路12は、シリアルに接続された複数の光ファイバ16、18、20、22、24からなる。光ファイバ18、22は、エルビウムを添加された光増幅ファイバである。ポンプ光源26、28はそれぞれ、光ファイバ16、24内でのラマンストークスシフト波長だけ光増幅ファイバ16、18のポンプ波長より短い波長のポンプ光を発生する。ポンプ光源26、28の出力光はそれぞれ、光カップラ30、32を介して光ファイバ16、24に印加される。光ファイバ16、24は、ポンプ光源26、28からのハイパワーのポンプ光による誘導ラマン効果により1次ストークス光のレーザ発振光を発生する。反射器34、36により、1次ストークス光のレーザ発振波長を制御する。そのレーザ発振光がポンプ光として光増幅ファイバ18、22に入力し、これにより、光増幅ファイバ18、22は信号光を増幅する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1のポンプ波長の第1のポンプ光により励起されて、信号光を光増幅する光増幅媒体と、第2のポンプ波長の第2のポンプ光を発生するポンプ光源と、

当該光増幅媒体に接続し、当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該ポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1のポンプ波長のレーザ発振した当該第1のポンプ光を発生する光ファイバと、

当該光ファイバ内において当該第2のポンプ光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す反射器とからなることを特徴とする光増幅器。

【請求項2】 当該反射器が当該第1のポンプ波長に等しい反射波長を具備する請求項1に記載の光増幅器。

【請求項3】 当該第1のポンプ光が、当該第2のポンプ光により誘導されるラマンストークス光のレーザ発振光である請求項1に記載の光増幅器。

【請求項4】 当該反射器が当該ラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備する請求項3に記載の光増幅器。

【請求項5】 当該光ファイバは、当該ポンプ光源の出力光により励起されて、当該ラマンストークス光のゲインピーク波長及び当該反射器の当該反射波長のレーザ発振光を発生する請求項4に記載の光増幅器。

【請求項6】 当該光増幅媒体が、希土類元素を添加された光ファイバからなる請求項1に記載の光増幅器。

【請求項7】 当該ポンプ光源から当該光ファイバに入力する当該第2のポンプ光の、当該光ファイバにおける光パワー密度が $0.016\text{ W}/\mu\text{m}^2$ 以上である請求項1に記載の光増幅器。

【請求項8】 更に、当該第1のポンプ光により当該光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第1の光ファイバに供給する補助光供給素子を具備する請求項1に記載の光増幅器。

【請求項9】 当該光ファイバが、実効断面積が小さくなる部分を具備する請求項1に記載の光増幅器。

【請求項10】 信号光を光増幅する第1及び第2の光増幅媒体と、

第1及び第2のポンプ光源と、

当該信号光を伝搬し、当該第1の光増幅媒体に入力する光ファイバであって、当該第1のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第1の光ファイバと、

当該第1の光増幅媒体で増幅された信号光を当該第2の光増幅媒体に伝搬する中継光線路と、

当該第2の光増幅媒体で増幅された当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該第2のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第2の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第2の光ファイバと、

当該第1の光ファイバ内において当該第1のポンプ光源

の出力光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す第1の反射器と、

当該第2の光ファイバ内において当該第2のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す第2の反射器とを具備することを特徴とする光増幅伝送路。

【請求項11】 当該第1の反射器が当該第1の光増幅媒体のポンプ光波長に等しい反射波長を具備し、当該第2の反射器が当該第2の光増幅媒体のポンプ光波長に等しい反射波長を具備する請求項9に記載の光増幅伝送路。

【請求項12】 当該第1及び第2の光ファイバは、それぞれ、当該第1及び第2のポンプ光源の出力光により誘導されるラマンストークス光のレーザ発振光を発生する請求項10に記載の光増幅伝送路。

【請求項13】 当該第1の反射器が当該ラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備し、当該第2の反射器が当該ラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備する請求項12に記載の光増幅伝送路。

【請求項14】 当該第1及び第2の光ファイバは、それぞれ、当該第1及び第2のポンプ光源の出力光により励起されて、当該ラマンストークス光のゲインピーク波長及び当該第1及び第2の反射器の当該反射波長のレーザ発振光を発生する請求項13に記載の光増幅伝送路。

【請求項15】 当該第1及び第2の光増幅媒体がそれぞれ、希土類元素を添加された光ファイバからなる請求項10に記載の光増幅伝送路。

【請求項16】 当該第1及び第2のポンプ光源からそれぞれ当該第1及び第3の光ファイバに入力する光の、当該第1及び第2の光ファイバにおける光パワー密度が $0.016\text{ W}/\mu\text{m}^2$ 以上である請求項10に記載の光増幅伝送路。

【請求項17】 更に、当該第1のポンプ光源の出力光により当該第1の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第1の光ファイバに供給する第1の補助光供給素子を具備する請求項10に記載の光増幅伝送路。

【請求項18】 更に、当該第2のポンプ光源の出力光により当該第2の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第2の光ファイバに供給する第2の補助光供給素子を具備する請求項10に記載の光増幅伝送路。

【請求項19】 当該第1及び第2の光ファイバの少なくとも一方が、実効断面積が小さくなる部分を具備する請求項10に記載の光増幅伝送路。

【請求項20】 信号光を光増幅する第1及び第2の光増幅媒体と、

第1及び第2のポンプ光源と、

当該信号光を伝搬し、当該第1の光増幅媒体に入力する

光ファイバであって、当該第 1 のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第 1 の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第 1 の光ファイバと、

当該第 1 の光増幅媒体で増幅された信号光を当該第 2 の光増幅媒体に伝搬する中継光線路と、

当該第 2 の光増幅媒体で増幅された当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該第 2 のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第 2 の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第 2 の光ファイバと、

当該第 1 の光ファイバ内において当該第 1 のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す第 1 の反射器と、

当該第 2 の光ファイバ内において当該第 2 のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す第 2 の反射器と、

当該第 1 の光ファイバに信号光を出力する光送信装置と、

当該第 2 の光ファイバから出力される信号光を受信する光受信装置とを具備することを特徴とする光伝送システム。

【請求項 2 1】 当該第 1 の反射器が当該第 1 の光増幅媒体のポンプ光波長に等しい反射波長を具備し、当該第 2 の反射器が当該第 2 の光増幅媒体のポンプ光波長に等しい反射波長を具備する請求項 2 0 に記載の光伝送システム。

【請求項 2 2】 当該第 1 及び第 2 の光ファイバは、それぞれ、当該第 1 及び第 2 のポンプ光源の出力光により誘導されるラマンストークス光のレーザ発振光を発生する請求項 2 0 に記載の光伝送システム。

【請求項 2 3】 当該第 1 の反射器が当該第 1 の光ファイバにおける当該ラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備し、当該第 2 の反射器が、当該第 2 の光ファイバにおける当該ラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備する請求項 2 0 に記載の光伝送システム。

【請求項 2 4】 当該第 1 及び第 2 の光ファイバは、それぞれ、当該第 1 及び第 2 のポンプ光源の出力光により励起されて、当該ラマンストークス光のゲインピーク波長及び当該第 1 及び第 2 の反射器の当該反射波長のレーザ発振光を発生する請求項 2 3 に記載の光伝送システム。

【請求項 2 5】 当該第 1 及び第 2 の光増幅媒体がそれぞれ、希土類元素を添加された光ファイバからなる請求項 2 0 に記載の光伝送システム。

【請求項 2 6】 当該第 1 及び第 2 のポンプ光源からそれぞれ当該第 1 及び第 2 の光ファイバに入力する光の、当該第 1 及び第 3 の光ファイバにおける光パワー密度が  $0.016 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  以上である請求項 2 0 に記載の光増幅伝送路。

【請求項 2 7】 更に、当該第 1 のポンプ光源の出力光

により当該第 1 の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第 1 の光ファイバに供給する第 1 の補助光供給素子を具備する請求項 2 0 に記載の光伝送システム。

【請求項 2 8】 更に、当該第 2 のポンプ光源の出力光により当該第 2 の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第 2 の光ファイバに供給する第 2 の補助光供給素子を具備する請求項 1 8 に記載の光伝送システム。

【請求項 2 9】 当該第 1 及び第 2 の光ファイバの少なくとも一方が、実効断面積が小さくなる部分を具備する請求項 1 8 に記載の光伝送システム。

【請求項 3 0】 第 1 のポンプ波長の第 1 のポンプ光により励起されて、信号光を増幅する光増幅媒体と、第 2 のポンプ波長の第 2 のポンプ光を発生するポンプ光源と、

当該光増幅媒体に接続し、当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該ポンプ光源の出力光により励起されて、当該第 1 のポンプ波長のレーザ発振した当該第 1 のポンプ光を発生する光ファイバと、

当該第 1 のポンプ光により当該光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該光ファイバに供給する補助光供給素子とを具備することを特徴とする光増幅器。

【請求項 3 1】 当該補助光供給素子が、当該光ファイバ内において当該ポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光の内、当該第 1 のポンプ波長とは異なる波長成分を戻す反射器である請求項 3 0 に記載の光増幅器。

【請求項 3 2】 当該反射器の反射波長が、当該ラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる波長である請求項 3 1 に記載の光増幅器。

【請求項 3 3】 信号光を増幅する第 1 及び第 2 の光増幅媒体と、

第 1 及び第 2 のポンプ光源と、

当該信号光を伝搬し、当該第 1 の光増幅媒体に入力する光ファイバであって、当該第 1 のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第 1 の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第 1 の光ファイバと、

当該第 1 の光増幅媒体で増幅された信号光を当該第 2 の光増幅媒体に伝搬する中継光線路と、

当該第 2 の光増幅媒体で増幅された当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該第 2 のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第 2 の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第 2 の光ファイバと、

当該第 1 の光ファイバ内において当該第 1 のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光により当該第 1 の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第 1 の光ファイバに供給する第 1 の補助光供給素子と、

当該第 2 の光ファイバ内において当該第 2 のポンプ光源

の出力光により発生するラマンストークス光により当該第2の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第2の光ファイバに供給する第2の補助光供給素子とを具備することを特徴とする光増幅伝送路。

【請求項34】 当該第1の補助光供給素子が、当該第1の光ファイバ内において当該第1のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備する第1の反射器であり、当該第2の補助光供給素子が、当該第2の光ファイバ内において当該第2のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備する第2の反射器である請求項33に記載の光増幅伝送路。

【請求項35】 信号光を光増幅する第1及び第2の光増幅媒体と、

第1及び第2のポンプ光源と、

当該信号光を伝搬し、当該第1の光増幅媒体に入力する光ファイバであって、当該第1のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第1の光ファイバと、

当該第1の光増幅媒体で増幅された信号光を当該第2の光増幅媒体に伝搬する中継光線路と、

当該第2の光増幅媒体で増幅された当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該第2のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第2の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第2の光ファイバと、

当該第1の光ファイバ内において当該第1のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光により当該第1の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第1の光ファイバに供給する第1の補助光供給素子と、

当該第2の光ファイバ内において当該第2のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光により当該第2の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第2の光ファイバに供給する第2の補助光供給素子と、

当該第1の光ファイバに信号光を出力する光送信装置と、

当該第2の光ファイバから出力される信号光を受信する光受信装置とを具備することを特徴とする光伝送システム。

【請求項36】 当該第1の補助光供給素子が、当該第1の光ファイバ内において当該第1のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備する第1の反射器であり、当該第2の補助光供給素子が、当該第2の光ファイバ内において当該第2のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光のゲインピーク波長とは異なる反射波長を具備する第2の反射器である請求項35に記載の光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光増幅器、光増幅伝送路及び光伝送システムに関し、より具体的には、光増幅媒体を遠く離れて励起する遠隔励起方式の光増幅器、光増幅伝送路及び光伝送システムに関する。

【0002】

【従来の技術】 光ファイバ伝送システムでは、伝送路上に光増幅器を配置することで、伝送距離を飛躍的に延ばすことができる。光増幅器の光増幅媒体は、エルビウム等の希土類を添加した光ファイバ（EDF）が一般的であるが、ラマン増幅を使用する場合、伝送用光ファイバ自身である。

【0003】 このような光増幅器を伝送路上に配置する光増幅伝送路及び光増幅伝送システムでは、光増幅媒体を可能な限り、光受信端局から離して光送信端局に近づけた方が、光SNR（信号対雑音比）の点で有利である。

【0004】 EDFのポンプ光源は、EDFの極く近くに配置するのが一般的であった。その場合、EDFの近傍にポンプ光源を配置し、そのポンプ光源に電力を供給しなければならない。即ち、光増幅器が大型化する。これは、数100km程度の中距離の光ファイバ伝送路では、光増幅器のコストが上がりすぎることと、収容管に収容しきれなくなるといった問題につながり、好ましくない。

【0005】 これに対し、光ファイバ伝送路中にEDFを挿入し、ポンプ光を信号光伝送光ファイバ又は専用光ファイバを介して伝送する構成が提案された。この方式は、ポンプ光源から約140km離れたEDFを励起することが可能になるので、遠隔励起方式と呼ばれる。一般に光増幅媒体として使用されるエルビウム添加光ファイバ（EDF）の励起光波長は、980nm帯及び1480nm帯であるが、遠隔励起方式の場合、光ファイバの伝送損失が少ない1480nm帯が用いられている。

【0006】 1480nm帯のポンプ光でEDFを遠隔励起する場合、そのポンプ光が伝搬する信号光伝送用光ファイバ上では、1580nm～1605nm付近の波長でラマン散乱効果による雑音光が成長する。光ファイバ通信で一般的に用いる信号光波長帯（Cバンド：1530nm～1560nm）に、この雑音光が重なり、信号光のSNRを劣化させる。

【0007】 1480nm帯ポンプ光の光パワーを増すことで、EDFの励起に必要なポンプ光パワーをより離れた場所で実現できるので、より遠くにEDFを配置できる。しかし、ポンプ光パワーを増すと、光ファイバ内でのダブルレイリー散乱によりレーザ発振が発生する。このレーザ発振は不安定であり、EDFのポンプパワーを不安定化する。このため、従来、光ファイバへのポンプ光入力パワーは、ダブルレイリー散乱が生じない程度

に低いパワーにすべきであると考えられていた。

【0008】信号光を伝送する光ファイバでポンプ光を伝搬する遠隔励起方式で、ポンプ光を信号光伝送用光ファイバ上でラマンストークスシフトにより約100nm長い波長に変換した上で、EDFに印加する構成が提案されている(米国特許6141468号)。この構成では、光ファイバに入力するポンプ光の波長が、ラマンストークスシフト波長相当分、EDFの励起波長(例えば、1480nm)より短いので、信号波長帯に重なる雑音光を低減できる。

【0009】遠隔励起方式において、ポンプ光を伝送する専用光ファイバを使用する構成も提案されている。例えば、"Error-free 2.5 Gbit/s unrepeatered transmission over 570km", ECOC 2000 Post deadline paper PD2-6、及び、"Error-free 32 x 10 Gbit/s unrepeatered transmission over 450 km", ECOC 2000 Post deadline paper, 1999を参照されたい。その構成では、ダブルレイリー散乱の発生原因となるラマンストークス波長付近の光雑音を除去する光フィルタをその専用光ファイバに設置する。この光フィルタにより、不安定なレーザ発振を抑制し、その結果、ポンプ光入力パワーを増加させることができる。専用光ファイバによりEDFの励起光を伝搬する遠隔励起方式で、その専用光ファイバの最長距離の報告例は、143kmである。

【0010】また、別の方法として、EDFを遠隔励起するポンプ光を更にラマンシフト波長分、波長の短い2次ポンプ光で増幅する構成も、報告されている(特開平9-197452号公報)。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】ポンプ光を伝搬するための専用光ファイバを用いる構成では、光ファイバケーブル中で信号光伝搬に使用できる光ファイバ数が減少する、光通信システムの構成及び管理が複雑化する上、結果的に、システム価格が上昇するという問題点がある。

【0012】米国特許6141468号に記載の従来例では、信号伝送用光ファイバ上でラマンストークスシフトによりポンプ光の波長を変換しているが、十分なパワーのEDFポンプ光を得られない。従って、受信端局から遠距離に配置したEDFを遠隔励起することは無理である。

【0013】EDFのポンプ光を別のポンプ光でラマン増幅することで、EDFのポンプ光を遠くにまで到達させる従来例では、2つの光源が必要になる。これもまた、光通信システムの構成を複雑化し、そのコストを上昇させる。

【0014】EDFを遠隔励起する距離は、現状では上

述の通り143km程度であるが、より遠くのEDFを励起したいとする要望がある。

【0015】本発明は、より安価で、簡単な構成で実現できる光増幅器、光増幅伝送路及び光伝送システムを提示することを目的とする。

【0016】本発明はまた、信号光の高いSNRを実現可能な光増幅器、光増幅伝送路及び光伝送システムを提示することを目的とする。

【0017】本発明はまた、より遠くに配置される光増幅媒体を励起できる光増幅器、光増幅伝送路及び光伝送システムを提示することを目的とする。

【0018】

【課題を解決するための手段】本発明に係る光増幅器は、第1のポンプ波長の第1のポンプ光により励起されて、信号光を光増幅する光増幅媒体と、第2のポンプ波長の第2のポンプ光を発生するポンプ光源と、当該光増幅媒体に接続し、当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該ポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1のポンプ波長のレーザ発振した当該第1のポンプ光を発生する光ファイバと、当該光ファイバ内において当該第2のポンプ光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す反射器とからなることを特徴とする。

【0019】本発明に係る光増幅伝送路は、信号光を光増幅する第1及び第2の光増幅媒体と、第1及び第2のポンプ光源と、当該信号光を伝搬し、当該第1の光増幅媒体に入力する光ファイバであって、当該第1のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第1の光ファイバと、当該第1の光増幅媒体で増幅された信号光を当該第2の光増幅媒体に伝搬する中継光線路と、当該第2の光増幅媒体で増幅された当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該第2のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第2の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第2の光ファイバと、当該第1の光ファイバ内において当該第1のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す第1の反射器と、当該第2の光ファイバ内において当該第2のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す第2の反射器とを具備することを特徴とする。

【0020】本発明に係る光伝送システムは、信号光を光増幅する第1及び第2の光増幅媒体と、第1及び第2のポンプ光源と、当該信号光を伝搬し、当該第1の光増幅媒体に入力する光ファイバであって、当該第1のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第1の光ファイバと、当該第1の光増幅媒体で増幅された信号光を当該第2の光増幅媒体に伝搬する中継光線路と、当該第2の光増幅媒体で増幅された当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該第2のポンプ光源の出力光により励起され



て、当該第2の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第2の光ファイバと、当該第1の光ファイバ内において当該第1のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す第1の反射器と、当該第2の光ファイバ内において当該第2のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光の所定波長成分を戻す第2の反射器と、当該第1の光ファイバに信号光を出力する光送信装置と、当該第2の光ファイバから出力される信号光を受信する光受信装置とを具備することを特徴とする。

【0021】上述の構成により、ポンプ光源から離れた位置に置かれる光増幅媒体を効率的に励起できる。

【0022】本発明に係る光増幅器は、第1のポンプ波長の第1のポンプ光により励起されて、信号光を増幅する光増幅媒体と、第2のポンプ波長の第2のポンプ光を発生するポンプ光源と、当該光増幅媒体に接続し、当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該ポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1のポンプ波長のレーザ発振した当該第1のポンプ光を発生する光ファイバと、当該第1のポンプ光により当該光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該光ファイバに供給する補助光供給素子とを具備することを特徴とする。

【0023】本発明に係る光増幅伝送路は、信号光を増幅する第1及び第2の光増幅媒体と、第1及び第2のポンプ光源と、当該信号光を伝搬し、当該第1の光増幅媒体に入力する光ファイバであって、当該第1のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第1の光ファイバと、当該第1の光増幅媒体で増幅された信号光を当該第2の光増幅媒体に伝搬する中継光線路と、当該第2の光増幅媒体で増幅された当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該第2のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第2の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第2の光ファイバと、当該第1の光ファイバ内において当該第1のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光により当該第1の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第1の光ファイバに供給する第1の補助光供給素子と、当該第2の光ファイバ内において当該第2のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光により当該第2の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第2の光ファイバに供給する第2の補助光供給素子とを具備することを特徴とする。

【0024】本発明に係る光伝送システムは、信号光を増幅する第1及び第2の光増幅媒体と、第1及び第2のポンプ光源と、当該信号光を伝搬し、当該第1の光増幅媒体に入力する光ファイバであって、当該第1のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第1の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第1の光ファイバと、当該第1の光増幅媒体で増幅された信号光を当該第2の

光増幅媒体に伝搬する中継光線路と、当該第2の光増幅媒体で増幅された当該信号光を伝搬する光ファイバであって、当該第2のポンプ光源の出力光により励起されて、当該第2の光増幅媒体を励起するポンプ光を発生する第2の光ファイバと、当該第1の光ファイバ内において当該第1のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光により当該第1の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第1の光ファイバに供給する第1の補助光供給素子と、当該第2の光ファイバ内において当該第2のポンプ光源の出力光により発生するラマンストークス光により当該第2の光ファイバで誘導される雑音光を抑制する補助光を当該第2の光ファイバに供給する第2の補助光供給素子と、当該第1の光ファイバに信号光を出力する光送信装置と、当該第2の光ファイバから出力される信号光を受信する光受信装置とを具備することを特徴とする。

【0025】上述の構成により不要な雑音光を効果的に抑制できる。

【0026】

20 【実施例】以下、図面を参照して、本発明の実施例を詳細に説明する。

【0027】図1は、本発明の一実施例の概略構成図を示す。10は、光ファイバ伝送路12に1550nm帯の信号光(波長 $\lambda_s$ )を出力する光送信装置、14は、光ファイバ伝送路12を伝搬した信号光を受信する光受信装置である。

【0028】光ファイバ伝送路12は、シリアルに接続された複数の光ファイバ16、18、20、22、24からなる。光ファイバ18、22は、エルビウムを添加された光増幅ファイバである。光ファイバ16、24は、信号光を伝搬すると共に、光増幅ファイバ18、22のポンプ光(波長 $\lambda_{pb}$ )を発生する光ファイバからなる。光ファイバ20は、光増幅ファイバ18、22の間であって、光増幅ファイバ18で増幅された信号光を増幅ファイバ22まで伝搬する。

【0029】光ファイバ16、20、24は、例えば、1.3 $\mu$ m帯にゼロ分散波長を具備し、カットオフ波長が1.3 $\mu$ m帯より短波長側に存在する単一モード光ファイバ、いわゆるスタンダードな単一モード光ファイバ(SMF)、1.5 $\mu$ m帯にゼロ分散波長をシフトした分散シフトファイバ(DSF)、又は、カットオフ波長を1.3 $\mu$ m帯以上の長波長側にシフトしたカットオフシフト光ファイバ(CSF)などからなる。理由は後述するが、ハイパワーの励起光を入力できることと、光増幅ファイバ18、22を遠くに配置できることから、光ファイバ16、24の実効断面積、特に光ファイバ24の実効断面積は、大きいほど好ましく、例えば100 $\mu$ m<sup>2</sup>以上であるのが好ましい。

【0030】詳細は後述するが、本実施例では、光増幅ファイバ18、22のポンプ光(波長 $\lambda_{pb}$ )を、ラマ



nstokesシフトにより光ファイバ16, 24内で生成する。26, 28は、それぞれ、光ファイバ16, 24内でラマンストークスシフトにより光増幅ファイバ16, 18のポンプ光(波長 $\lambda_{pb}$ )を発生させるポンプ光(波長 $\lambda_{pa}$ )を発生するポンプ光源である。光増幅ファイバ18, 22がエルビウム添加光ファイバからなり、且つ、1次ラマンストークスシフトを使用する場合、ポンプ光源26, 28は、例えば、1380~1390 nmでレーザ発振するレーザ素子からなる。エルビウム添加光ファイバの励起波長が1480 nmであり、且つ、1次ラマンストークスシフトでは、入射光の波長より約13.2~14.7 THz (1.5  $\mu$ m帯では約100 nm) 長い波長の光が得られるからである。

【0031】光ファイバ伝送路12の入力端で、即ち、光送信装置10と光ファイバ16との間で、光カップラ30が、ポンプ光源26の出力するポンプ光(波長 $\lambda_{pa}$ )を信号光(波長 $\lambda_s$ )の伝搬方向と同方向で光ファイバ16に導入する。また、光ファイバ伝送路12の出力端で、即ち、光ファイバ24と光受信装置14との間で、光カップラ32が、ポンプ光源28の出力するポンプ光(波長 $\lambda_{pa}$ )を光ファイバ24に信号光(波長 $\lambda_s$ )の伝搬方向とは逆方向で導入する。

【0032】光送信装置10と光カップラ30の間に、光ファイバ16で発生する1次ストークス光を反射する反射器34を配置した。これにより、光ファイバ16におけるストークス光のレーザ発振波長 $\lambda_{pb}$ を精密に制御できる。光カップラ32と光受信装置14の間に同様の反射器36を配置した。これにより、光ファイバ24におけるストークス光のレーザ発振波長 $\lambda_{pb}$ を精密に制御できる。反射器34, 36は、1480 nm帯に数nmの狭帯域の反射波長を具備する。反射器34, 36は勿論、信号光を無損失又は低損失で透過する。反射器34を光カップラ30と光ファイバ16の間に配置し、反射器36を光ファイバ24と光カップラ32の間に配置しても良い。更には、反射器34, 36をそれぞれ光ファイバ16, 24の中に配置してもよい。

【0033】2~5 nmといった狭帯域の反射器34, 36は、例えば、光ファイバグレーティング、又は、狭帯域の光バンドパスフィルタと波長選択性の無い又は少ない反射ミラーの組み合わせにより実現できる。0.2 nm程度の帯域幅でも同等のことがあることを実験で確認した。波長選択性のある光フィルタとして、光ファイバ又は光導波路から構成されるマッハツエンダ型デバイス、及び、導波路回折格子と反射ミラーの組み合わせ等が使用可能である。

【0034】光カップラ30, 32が光ファイバ16, 24からの波長 $\lambda_{pb}$ の光をポンプ光源26, 28に向けて結合する場合、図2に示すように、反射器34, 36の代わりに、波長 $\lambda_{pa}$ を透過し、波長 $\lambda_{pb}$ を反射する反射器38, 40を光カップラ30, 32とポンプ

光源26, 28の間に配置する。

【0035】1つの光ファイバでポンプ光と信号光を伝達する従来の遠隔励起方式では、そのポンプ光の波長は、光増幅ファイバを直接励起可能な波長(エルビウム添加光ファイバの場合、1480 nm)である。光ファイバに入力するポンプ光パワーは、ダブルレイリー散乱に起因する不安定なレーザ発振が発生しない程度に抑えられていた。即ち、ダブルレイリー散乱に起因する不安定なレーザ発振が発生しないパワーが、光ファイバに入力するポンプ光パワーの上限になっていた。これが、EDFまでの距離を延ばせない大きな理由であった。

【0036】これに対し、本出願の発明者は、既存の上限を越えるポンプ光パワーを入力することで、光ファイバ16, 24内でストークス散乱光の安定的なレーザ発振が起こることを発見した。即ち、本実施例では、ポンプ光源26, 28の出力パワーを既存の上限を越えた値に設定した。これにより、光ファイバ16, 24内でストークス散乱光の安定的なレーザ発振が起こる。このストークス散乱のレーザ発振光が、光増幅ファイバ18, 22のポンプ光(波長 $\lambda_{pb}$ )となる。反射器34, 36, 38, 40により1次ストークス光のレーザ発振波長波長 $\lambda_{pb}$ を制御できる。光増幅ファイバ18, 22がエルビウム添加光ファイバからなる場合、ポンプ光源26, 28の波長 $\lambda_{pa}$ は、上述の通り、光増幅ファイバ18, 22の励起波長 $\lambda_{pb}$ よりもラマンストークスシフト波長(1次ラマンストークスシフト光の場合で約13.2~14.7 THz)だけ短い波長に設定される。

【0037】本実施例の信号光増幅動作を簡単に説明する。光送信装置10は1550 nm帯の信号光(波長 $\lambda_s$ )を光ファイバ伝送路12の光ファイバ16に入力する。光カップラ30は、ポンプ光源26からのポンプ光(波長 $\lambda_{pa}$ )を光ファイバ16に入力する。

【0038】ポンプ光源26の出力するポンプ光(波長 $\lambda_{pa}$ )の光パワーが十分に大きいので、光ファイバ16内でラマン効果によるストークス散乱光が増加する。そのストークス散乱光は、終には、光ファイバ16内のストークスシフト波長付近に発生するレイリー散乱によりポンプ光と逆方向に反射され、その反射光がラマン増幅され、更にレイリー散乱によりポンプ光伝搬方向に反射される。この共振器構造により、波長 $\lambda_{pa}$ よりラマンストークスシフト波長だけ長い波長 $\lambda_{pb}$ でレーザ発振する。反射器34, 38を設けたので、反射器34, 38の反射波長で、共振器のゲインが最も高くなり、レーザ発振しやすくなる。

【0039】即ち、光ファイバ16は、ポンプ光源26の出力するポンプ光(波長 $\lambda_{pa}$ )により励起され、所定シフト波長(1次ラマンストークスシフト光の場合で約13.2~14.7 THz)だけ長い第2のポンプ光(波長 $\lambda_{pb}$ )を発生する。光増幅ファイバ18がエル

ビウム添加光ファイバからなる場合、上述の通り、波長  $\lambda_{pb}$  は約 1480 nm である。

【0040】要約すると、光ファイバ16は、信号光（波長  $\lambda_s$ ）を伝搬する機能と、ポンプ光源26の出力するポンプ光（波長  $\lambda_{pa}$ ）を、所定シフト波長だけ長い、レーザ発振した第2のポンプ光（波長  $\lambda_{pb}$ ）に変換する波長変換機能とを併せ持つ。

【0041】光ファイバ16で発生した第2のポンプ光（波長  $\lambda_{pb}$ ）と、光ファイバ16を伝搬した信号光（波長  $\lambda_s$ ）は、光増幅ファイバ18に入力する。光増幅ファイバ18は、第2のポンプ光（波長  $\lambda_{pb}$ ）により励起されて、信号光（波長  $\lambda_s$ ）を増幅する。

【0042】光増幅ファイバ18で増幅された信号光（波長  $\lambda_s$ ）は、光ファイバ20を伝搬し、光増幅ファイバ22に入力する。

【0043】光ファイバ24内でも、光ファイバ16と同様の現象が起きる。即ち、光ファイバ24もまた、ポンプ光源28の出力するポンプ光（波長  $\lambda_{pa}$ ）により、光増幅ファイバ22を励起するポンプ光（波長  $\lambda_{pb}$ ）を発生する。光ファイバ24の実効断面積を例えば 100  $\mu\text{m}^2$  以上のように通常よりも大きくすると、ストークス散乱光は、光ファイバ24内で、光カップラ32からより離れた位置で強く発生する。例えば、光ファイバ24にポンプ光パワー密度 0.016 W/ $\mu\text{m}^2$  以上のポンプ光を入射する。

【0044】一定ポンプ光パワー密度入射の条件では、実効断面積が異なっても、一定距離伝送後のポンプ光パワー密度はほぼ等しい。受信パワーはパワー密度と実効断面積の積に等しいので、実効断面積が大きい程、一定距離伝送後のポンプ光パワーが大きいことを意味する。これは、ポンプ光パワー一定の条件では、光ファイバの実効断面積が大きいほど光ファイバ24を長くできること、即ち、光増幅ファイバ22を光カップラ32から遠く離れた位置に配置できることを意味する。光増幅ファイバ22は、光ファイバ24内で発生するストークス散乱のレーザ発振光（波長  $\lambda_{pb}$ ）により励起されて、光ファイバ20から入力する信号光（波長  $\lambda_s$ ）を増幅する。

【0045】光ファイバ22で増幅された信号光（波長  $\lambda_s$ ）は、光ファイバ24に入射し、光ファイバ24を伝搬して光受信装置14に入力する。

【0046】図3は、光ファイバ16、24でレーザ発振した1次ストークス光のスペクトル分布例を示す。横軸は波長を示し、縦軸は光パワーを示す。但し、単にストークス光のレーザ発振を確認する目的で、1480 nmレーザ光を光ファイバに入射した。入射光の光パワーは、約8 Wである。図3から、確かにポンプ光波長よりも約 14.7 THz（約 110 nm）長い波長でレーザ発振しており、且つ、ポンプ光のエネルギーが1次ストークス光に移行していることが分かる。

【0047】168 km長の光ファイバで、1480 nm光をそのまま伝搬させた場合の到達光パワーと、1480 nm光による1次ラマンストークスシフト光の到達光パワーを比較した。その結果、後者の場合の到達光の光パワーは、前者の場合の到達光パワーよりも5 dB以上、大きかった。Cバンドを増幅する場合、光ファイバに入力するポンプ光の波長はこれよりも約 13.2 ~ 14.7 THz 短い波長になる。

【0048】そこで、波長による相違を確認した。具体的には、1425 nmのポンプ光と1480 nmのポンプ光により1次ラマンストークスシフト光強度を比較した。ポンプ光パワーが3 W未満では、有意な差が認められたが、3 W以上では実質的な差は認められなかった。即ち、ある程度以上のパワーで1380 ~ 1390 nmのポンプ光を光ファイバ16、24に入力した場合、1480 nmポンプ光をそのまま光ファイバ16、24で伝搬させる場合に比べて、EDF18、22により強い1480 nm光を入力できる。換言すると、従来例よりも光ファイバ16、24を長くすることができる。

【0049】反射器34、36、38、40を設けることで、幾つかの利点がある。第1の利点として、上述の通り、光ファイバ16、24内でストークス散乱光の内レーザ発振する波長  $\lambda_{pb}$  を精密に制御できる。これは、ポンプ光源26、28の大きな波長誤差を許容できることを意味する。試しに、実効断面積が180  $\mu\text{m}^2$ の光ファイバへの入射光波長を1480 nmとした場合と、1425 nmとした場合とで、同じ波長の1次ストークス光の光パワーを光パワーメータで計測した。図4は、その計測結果を示す。横軸は光ファイバへの入射光パワー、縦軸は168 km伝送後の1次ストークス光の相対光パワー（dB）である。図4から分かるように、レーザ発振前では、1次ストークス光の光パワーは、ポンプ波長により異なっていたが、レーザ発振後では、ほとんど同じになっていた。

【0050】図5は、反射器34、36の反射波長により1次ストークス光のレーザ発振波長を制御した実験でのスペクトル例を示す。縦軸は1次ストークス光の相対光パワー（dB）を示し、横軸は波長を示す。実験設備の関係で、波長1425 nmで2 Wのポンプ光を170 kmの分散シフトファイバ（実効断面積55  $\mu\text{m}^2$ ）に入力し、その1次ストークス光出力を測定した。反射波長は、1501.6 nm、1510 nm、1520 nm、1530 nm及び1536.4 nmであり、反射帯域幅は2 nmである。図5から分かるように、35 nm程度の範囲で1次ストークス光のレーザ発振波長を制御できた。

【0051】第2の利点として、反射器34、38は、光ファイバ16内で発生するストークス光の内、光送信装置10に向かう成分を光増幅ファイバ18に向けることができ、反射器36、40は、光ファイバ24内で発

生するストークス光の内、光受信装置14に向かう成分を光増幅ファイバ22に向けることができる。これは、光増幅ファイバ18, 22の励起効率が向上することを意味する。

【0052】図6は、励起効率の改善を示す測定例である。上述のように、現在、1380~1390nmのハイパワーレーザ素子を手に入れないので、1480nm帯レーザ素子で実験した。実効断面積が $55\mu\text{m}^2$  (DSF)、 $80\mu\text{m}^2$  (CSF)、 $110\mu\text{m}^2$  (SMF)、及び $180\mu\text{m}^2$  (SMF)について、170km伝送後の1次ストークス光の光パワーを計測した。横軸は、光ファイバに入射するポンプ光の光パワー密度（入射光パワーを光ファイバの実効断面積で除算した値）、縦軸は、1次ストークス光の光パワー (dBm) をそれぞれ示す。

【0053】光ファイバへの入射光の光パワーを増していくと、徐々に1次ストークス光が強くなり、パワー密度にして $0.016\text{W}/\mu\text{m}^2$ を近辺で1次ストークス光がレーザ発振し、光パワーが急増する。 $0.02\text{W}/\mu\text{m}^2$ 以上では、ピーク光パワーに対して5dB内に入る。その後、入射光パワーの増加に連れて徐々に1次ストークス光の光パワーが増大する。光ファイバへの入射光の光パワー密度が $0.04\text{W}/\mu\text{m}^2$ になる付近で、最も強い1次ストークス光が得られていることが分かる。これ以上に光ファイバへの入射光を強くすると、2次ストークス光へのシフトが顕著になるので、1次ストークス光の光パワーが減少する。

【0054】光ファイバ16, 24の一部において実効断面積を低損失で小さくすれば、その箇所のポンプ光パワー密度を増すことができる。これにより、レーザ発振するラマンストークス光の発生箇所を制御できる。

【0055】例えば、光ファイバ24に入射するポンプ光のパワーを1W (30dBm)とし、光ファイバ24の実効断面積を $200\mu\text{m}^2$ とする。光ファイバ24への入射位置でのポンプ光パワー密度は、 $0.005\text{W}/\mu\text{m}^2$ となる。これは、1次ストークス光の安定的なレーザ発振閾値 $0.016\text{W}/\mu\text{m}^2$ に比べ十分に低い。一方、高非線形光ファイバとして実効断面積が $2\mu\text{m}^2$ の光ファイバを作成可能である。この光ファイバで $0.02\text{W}/\mu\text{m}^2$ になるポンプ光パワーは0.04W (16dBm)である。光ファイバ24の伝送損失を0.2dB/kmであるとする、70km先にこの高非線形光ファイバを挿入することで、1次ストークス光の安定的なレーザ発振閾値 $0.016\text{W}/\mu\text{m}^2$ に比べ十分に高いポンプ光パワー密度を実現できるので、ラマンストークス光の発生箇所を制御できる。光ファイバ16でも同様である。

【0056】第3の利点として、2次ラマンストークスシフトによる、信号波長帯に重なるノイズ光を低減又は抑制できる。

【0057】一般的に、光ファイバ16, 24で発生する1次ストークス光により励起されて、光ファイバ16, 24, 20内でラマン効果によりその1次ストークス光より約13.2~14.7THz長い波長帯で雑音光 (2次ストークス光)が発生及び増加する。光ファイバ16, 24内でレーザ発振する1次ストークス光の波長が約1480nmの場合、2次ストークス光の波長は、約1580~1490nmであり、これが雑音光として信号光波長帯と重なり、信号光のSNRを悪化させる。また、1次ストークス光をレーザ発振させる場合、そのレーザ発振光によるラマン効果で、レーザ発振波長より約13.2~14.7THz長い波長帯で雑音光が発生及び増加する。この雑音光の波長帯は、上述の2次ストークス光の波長帯に重なる。

【0058】図7は、レーザ発振した1次ストークス光と2次雑音光のスペクトル分布例を示す。先に説明した事情から、光ファイバに波長1425nmの2Wの光を入射した。入射光の波長は、本来のポンプ光波長 $\lambda_{pa}$ よりも約50nm長い。横軸は波長、縦軸は相対光パワー (dB)を示す。2nm幅の反射波長1503.2nm、1510nm、1520nm、1530nm及び1536.4nmの各場合について、光ファイバの出力光のスペクトルを調べた。光ファイバの長さは170kmである。

【0059】図7から、1次ストークス光の発振波長 (反射波長)にもよるが、1600~1640nm帯で大きな雑音光が成長することが分かる。この雑音光は、1425nmポンプ光による2次ストークス光と、1425nmポンプ光による1次ストークス光のレーザ発振光から更にラマン効果により1次的に誘導される散乱光とからなる。これらの雑音光を総称として、2次雑音光と呼ぶ。図1及び図2に示す実施例のように、1380~1390nmポンプ光を光ファイバ16, 24に入射した場合、図7の1600~1640nmは、1550~1590nmに相当する。従って、1次ストークス光のレーザ発振波長を1480nm付近に設定した場合、上述の2次雑音光がCバンドの波長帯に重なる。

【0060】1536.4nmで1次ストークス光をレーザ発振させた場合、1600~1640nm帯で雑音光は非常に少ないことに注意されたい。これは、反射器34, 36の反射波長を適切に選択し、且つ、ポンプ光源26, 28の出力パワーを適切に設定することにより、信号波長帯での雑音光の増加を抑制できることを示している。

【0061】誘導ラマン散乱の1次ストークス光は、周波数シフト13.2THzと14.7THzでゲインがピークになる。初期的には、周波数シフト13.2THzに相当する波長の散乱光の光パワーが増大し、それに続いて、周波数シフト14.7THzに相当する波長の散乱光の光パワーが増大する。図8は、CSF光ファイ

バのラマンシフトのゲインプロファイルを示す。横軸は周波数シフト (THz)、縦軸はゲインを示す。一般的には、短波長側の周波数シフト13.2 THzに相当する波長でレーザ発振しやすい。

【0062】先に説明したように、1425 nmポンプ光による1次ストークス光で最もレーザ発振しやすい波長は、1525~1530 nmであり、それより長い波長ではゲインが急速に低下する。従って、反射器34、36の反射波長を周波数シフト13.2 THzに相当する波長よりも長い波長、好ましくは、周波数シフト14.7 THzに相当する波長よりも長い波長に設定することで、2次雑音光を信号波長帯より長い波長帯にシフトさせることができ、信号波長帯での雑音の増加を抑制できる。

【0063】図9は、反射器により1次ストークス光の周波数シフト13.2 THzに相当する波長よりも短い波長で強制的にレーザ発振させた場合のスペクトル例を示す。先に説明した事情から、光ファイバに波長1425 nmの2 Wの光を入射した。横軸は波長、縦軸は相対光パワー (dB) を示す。2 nm幅の反射波長1501.6 nm、1503.2 nm、1505.2 nm及び1508 nmの各場合について、光ファイバの出力光のスペクトルを調べた。光ファイバの長さは170 kmである。何れも、1次ストークス光は反射器の反射波長でレーザ発振している。

【0064】図9において、1600~1650 nm帯で雑音光 (2次雑音光) が成長していることに注意されたい。特に、レーザ発振波長 (ここでは、反射波長) をラマンシフトのゲインピーク波長 (約1520 nm) に近い波長に調節する程、雑音レベルが大きくなっている。これは、図8に示すように、レーザ発振波長 (ここでは、反射波長) がラマンゲインのゲインピーク波長 (約1520 nm) に近い程、ラマンゲインが大きくなるので、レーザ発振が起こりやすくなり、従って、2次雑音光が誘導されやすいからである。

【0065】上述の各実施例では、1次ストークス光を生成するポンプ光の光パワーを適切に調節しないと、信号波長帯に重なる波長帯で2次雑音光が増加する。ポンプパワーが大きすぎる場合、2次雑音光でレーザ発振が生じることがある。例えば、そのようなレーザ発振には、2次ストークス光のレーザ発振と、1次ストークス光のレーザ発振からラマン効果により誘導される1次ストークス光のレーザ発振とがある。このような2次雑音光の増加及びレーザ発振は、1次ストークス光を意図的に複数波長でレーザ発振させることで、防止できる。

【0066】図10は、また、1次ストークス光を2波長でレーザ発振させた場合の測定例を示す。先に説明した事情から、光ファイバに波長1425 nmの3.9 Wの光を入射した。長さ170 km、実効断面積80  $\mu\text{m}^2$  の光ファイバ (CSF) を使用した。横軸は、ポンプ

光波長1425 nmに対応する周波数からの相対的な周波数 (THz) を示し、縦軸は相対光パワー (dB) を示す。5 nm幅の反射波長1502 nm、1520 nm及び1538 nmの各場合について、光ファイバの出力光のスペクトルを調べた。

【0067】先に説明したように、1次ストークス光のゲインピークは、13.2 THzであるので、反射波長1520 nmは、ストークス光をそのゲインによりレーザ発振させた場合に相当する。反射波長を1520 nmにした場合、信号波長帯に重なる2次雑音光が大きく成長している。特に、2次ストークス光のレーザ発振 (波長1640 nm付近) が生じており、更に、1520 nmのレーザ発振からのラマンシフト13.2 THzによるレーザ発振 (波長1630 nm付近) が僅かに起きている。

【0068】反射波長を1502 nmにした場合、その1502 nmでのレーザ発振と、ラマンシフトのゲインピーク波長に相当する1520 nmでのレーザ発振とが生じている。反射波長を1538 nmにした場合、その1538 nmでのレーザ発振と、ラマンシフトのゲインピーク波長に相当する1520 nmでのレーザ発振とが生じている。しかし、何れの場合も、信号波長帯に重なる雑音光を抑制できている。

【0069】反射波長1502 nmの実験データでは、24乃至25 THz 近辺で少し雑音光が大きくなっているが、この雑音光は、1502 nmのレーザ発振光の光パワーによりラマン誘導された周波数シフト13.2 THzのストークス散乱光からなる。1520 nmでのレーザ発振光の光パワーと1502 nmレーザ発振光の光パワーをほぼ等しくすることで、このような雑音光を低減できる。

【0070】ラマンゲインのピーク波長とこれ以外の波長の2波長でレーザ発振させる場合、両波長のレーザ光パワーをほぼ均等にするのが望ましい。そのための条件を調べた。図11は、その検討結果例を示す。横軸はポンプ光パワーを示し、縦軸は、ピーク値を100%としたときのリニアスケールでの相対的なラマンゲインを示す。ラマンゲインは、図8に示すグラフから、波長と1対1に対応する。

【0071】ラマンゲインのピーク波長より短い波長帯でレーザ発振させる場合、ポンプ光パワーの増加に連れて、ラマンゲインの大きい波長、即ちラマンゲインのピーク波長により近付いた波長でレーザ発振させればよい。

【0072】他方、ラマンゲインのピーク波長より長い波長帯でレーザ発振させる場合、ポンプ光パワーの増加に連れて、ラマンゲインの小さい波長、即ちラマンゲインのピーク波長からより離れた波長でレーザ発振させればよい。

【0073】ラマン効果は、エネルギーが長波長側にシ

10

20

30

40

50

フトする現象である。従って、ポンプ光を増加した場合、2つのレーザ発振波長の内の長波長側に多くのパワーが配分される。従って、ラマンゲインのピーク波長とこれより短い波長の2波長で同時レーザ発振する場合、ポンプパワーの増加に対して、前者の波長での光パワーの伸びが、後者の波長の光パワーの伸びよりも大きい。両者をバランスさせるには、後者の波長を、よりレーザ発振しやすい波長、即ち、ゲインの高い波長にすればよい。

【0074】ラマンゲインのピーク波長とこれより長い波長の2波長で同時レーザ発振する場合は逆の関係になる。すなわち、ポンプパワーの増加に対して、後者の波長の光パワーの伸びが前者の波長の光パワーの伸びより大きい。両者をバランスさせるには、後者の波長を、よりレーザ発振しにくい波長、即ち、ゲインの低い波長にすればよい。

【0075】上述の実施例では、反射波長を調節して1次ストークス光を2波長でレーザ発振させたが、同様の波長のレーザ光（補助レーザ光）を外部から導入しても、同様に2次雑音光を抑制できる。この場合、複数種類のポンプ光源が必要になる。しかし、EDFに対する、よりパワーの大きなポンプ光を生成し且つ信号波長帯での雑音光を抑制できるので、遠隔励起方式の伝送距離を長くできると共に、SNRを改善できるという利点がある。

【0076】例えば、上述の実施例において、光受信装置14から光ファイバ24にその補助レーザ光を出力し、光送信装置10から光ファイバ16にその補助レーザ光を出力すればよい。勿論、ポンプ光源26、28内に、補助レーザ光を出力する光源を設け、光カップラ30、32によりそれぞれ光ファイバ16、24内に補助レーザ光を導入するようにしてもよい。

【0077】補助光波長はラマン増幅におけるラマンストークスシフト波長以外の波長、例えば、13.2THz及び14.7THz以外の波長である。ラマンストークスシフト波長の短波長側では、正規化したラマンゲインで50%程度以上のゲインに相当する波長に補助光波長を設定すればよい。ラマンストークスシフト波長の長波長側では、正規化したラマンゲインで80%程度以下のゲインに相当する波長に補助光波長を設定すればよい。

【0078】信号光を増幅する媒体としてEDFを例示したが、EDFの代わりにラマン増幅媒体を使用しても、同様の作用効果を得ることができる。

【0079】1次ストークス光をレーザ発振させる実施例を説明したが、2次以上のストークス光をレーザ発振させても良いことは明らかである。

【0080】

【発明の効果】以上の説明から容易に理解できるように、本発明によれば、非常に簡単な構成で、遠距離の光増幅媒体を効率的に励起できる。反射器を配置することで、ストークス光のレーザ発振波長を微細に制御できると共に、発振閾値を低減できる。レーザ発振波長の制御により、信号波長帯に重なる雑音光を抑制できる。更には、複数波長を同時にレーザ発振させることもで、信号波長帯に重なる雑音光を効果的に抑制できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1実施例の概略構成図である。

【図2】 本発明の第2実施例の概略構成図である。

【図3】 光ファイバ16、24でレーザ発振した1次ストークス光のスペクトル分布例である。

【図4】 ポンプパワーに対する1次ストークス光のパワー変化例である。

【図5】 反射器34、36によりレーザ発振波長を制御された1次ストークス光のスペクトル例である。

【図6】 ポンプ光パワー密度と1次ストークス光の光パワーの関係の測定結果である。

【図7】 レーザ発振した1次ストークス光及び2次雑音光のスペクトル分布例である。

【図8】 CSF光ファイバのラマンシフトのゲインプロファイルである。

【図9】 1次ストークス光の周波数シフト13.2THzに相当する波長よりも短い波長で強制的にレーザ発振させた場合のスペクトル例である。

【図10】 1次ストークス線を2波長でレーザ発振させた場合のスペクトル例である。

【図11】 2波長のレーザ光パワーをほぼ均等にする条件である。

【符号の説明】

10：光送信装置

12：光ファイバ伝送路

14：光受信装置

16、20、24：光ファイバ

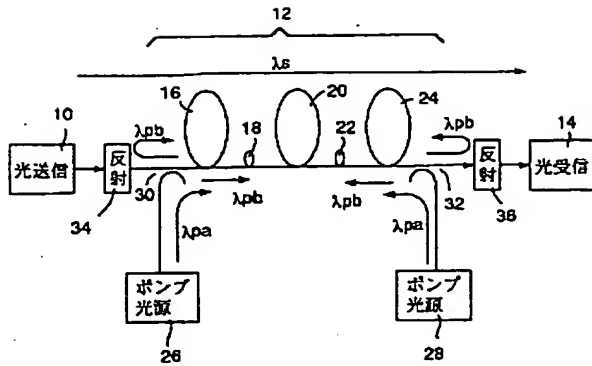
18、22：光増幅ファイバ（EDF）

26、28：ポンプ光源

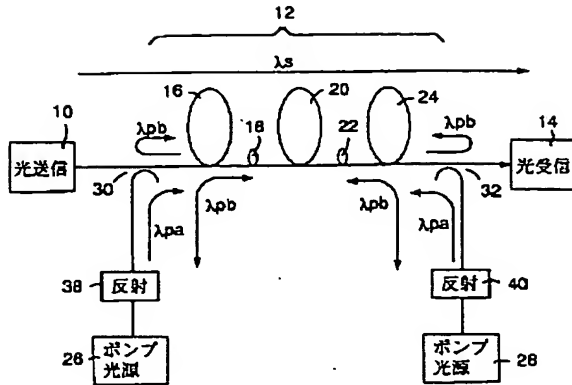
30、32：光カップラ

34、36、38、40：反射器

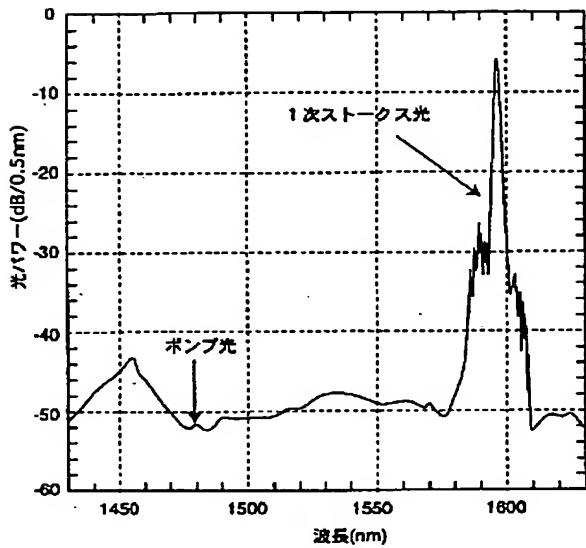
【図 1】



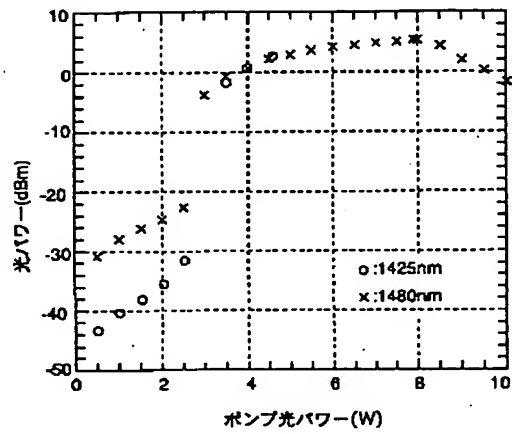
【図 2】



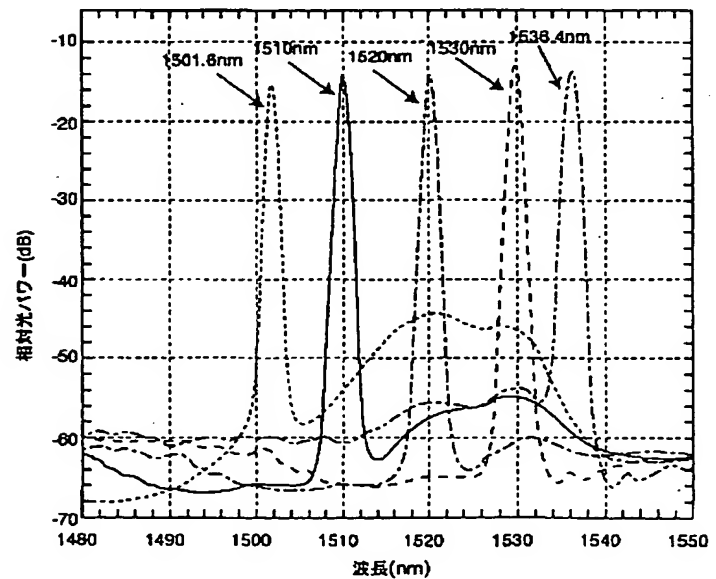
【図 3】



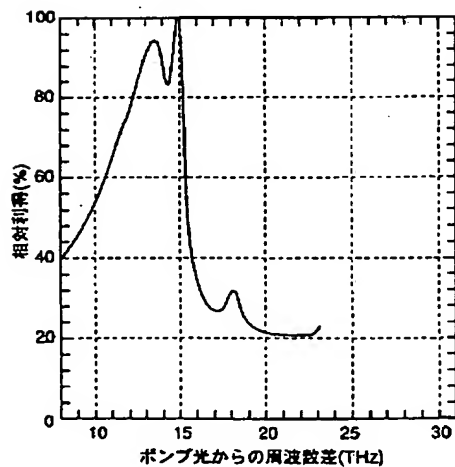
【図 4】



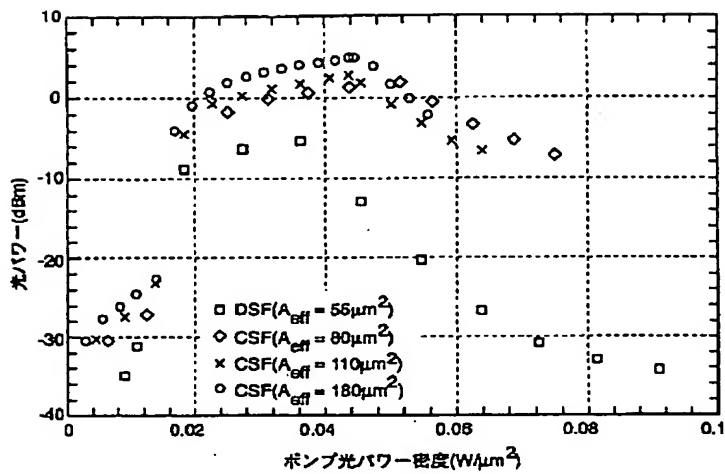
【図 5】



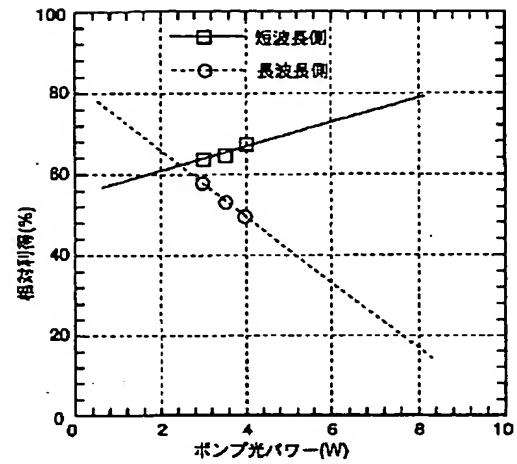
【図 8】



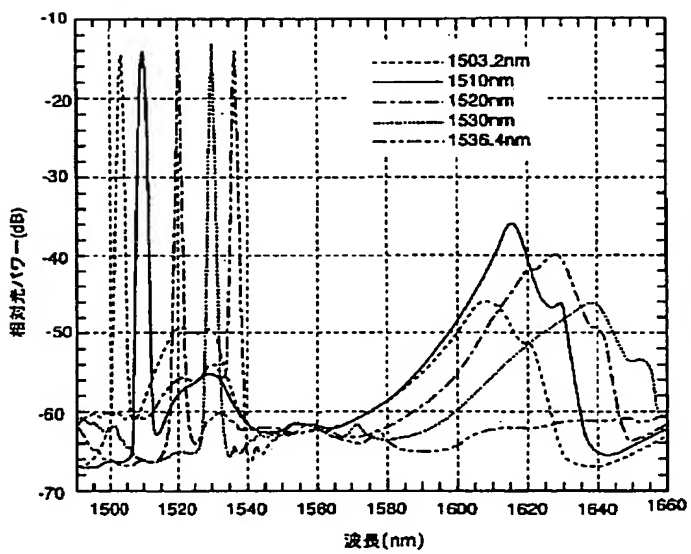
【図 6】



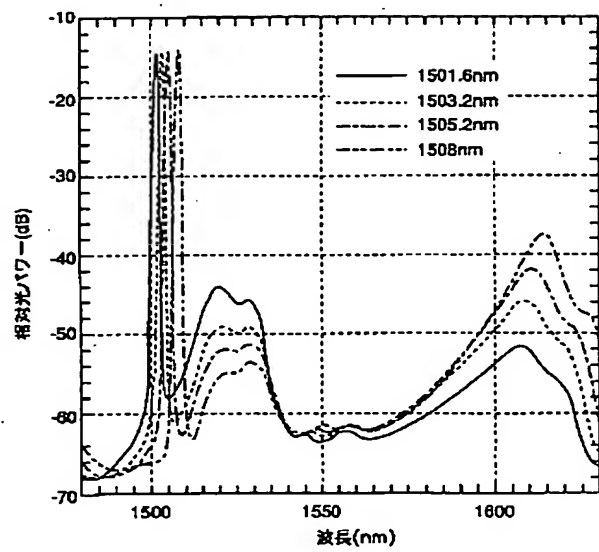
【図 11】



【図 7】

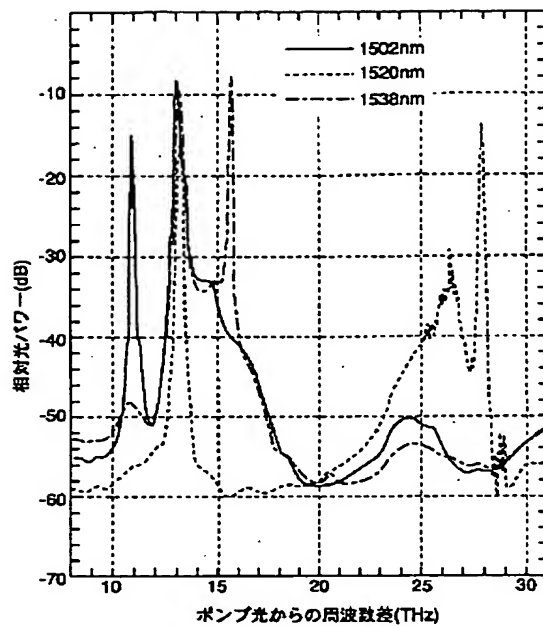


【図 9】





【図10】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テーマコード (参考)

H 0 4 B 10/17

Fターム(参考) 2K002 AA02 AB27 AB30 AB40 BA01  
CA15 DA10 EA07 HA23  
5F072 AB09 AK06 JJ08 JJ09 JJ20  
QQ07 YY17  
5K002 AA01 AA03 AA06 BA21 CA13  
FA01